

海陆交互沉积土次固结试验与蠕变方程研究

李刚^{1,2}, 张金利², 杨庆², 蒋明镜³

(1. 西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 海陆交互沉积土广泛分布于沿海地区, 其力学性质较其他沉积土有所不同。针对大连海陆交互沉积土原状样, 采用一维蠕变试验对黏性土的蠕变特性进行了研究。基于蠕变试验结果, 建立了可以考虑沉积土主、次固结效应的蠕变方程。研究表明: 该地区沉积土具有典型的非线性蠕变特性。随固结压力的增加, 土体应变随之增大, 稳定时间越长, 主次固结分界点也愈加明显。沉积土属中等至高次压缩性土, 次固结系数随固结时间的增加而减小, 随固结压力的增加而增大。不同深度黏性土次固结系数与压缩指数的比值介于 0.033 ~ 0.058 之间, 与 Mesri 结论相符。模型计算结果与试验结果吻合较好, 表明蠕变方程适用于描述大连海陆交互沉积土的蠕变特性。

关键词: 海陆交互沉积; 黏性土; 主固结; 次固结; 蠕变方程

中图分类号: TU411.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0194-06

Study on the secondary consolidation test and creep equation of marine-terrestrial interactive deposits

LI Gang^{1,2}, ZHANG Jinli², YANG Qing², JIANG Mingjing³

(1. Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an 710123, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Marine-terrestrial interactive deposits are widely distributed in the coastal cities, and the mechanical properties are different from the other deposits. Considering the undistributed samples of marine-terrestrial interactive deposit in Dalian, the creep behaviors of Dalian marine-terrestrial deposits were studied according to one dimensional creep tests. Based on the test results, the creep equation was established which considered the primary consolidation and secondary consolidation in the meantime. The results showed that, Dalian deposits have typical nonlinear creep behavior. With the increasing of consolidation pressure, the strain is increased. The longer the stability time is, the more obvious demarcation point between primary and secondary consolidation is. The deposits belong to medium to high secondary compressibility soil, and the secondary consolidation coefficient is decreasing with the increasing of consolidation time, and increasing as the consolidation pressure increases. The ratio of secondary consolidation coefficient to compression index in different depth ranges from 0.033 to 0.058, which conforms to Mesri conclusion. The tests results agree well with the calculation results, which showed that the creep equation is suitable for describing the creep behaviors of Dalian marine-terrestrial interactive deposits.

Key words: marine-terrestrial interactive deposit; clayey soils; primary consolidation; secondary consolidation; creep equation

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572252)

作者简介: 李刚(1983-), 男, 辽宁本溪人, 博士, 讲师, 主要从事海洋土力学特性试验与人工岛沉降的数值计算等研究。

通讯作者: 杨庆(1964-), 男, 辽宁锦西人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程及工程地质等研究。

1 研究背景

随着城市化进程的加速,可用于工程建设的土地资源越来越少。因此,沿海地区多采用填海造地来满足建设用地的需求。海床土体通常由海相沉积、海陆交互沉积及陆相沉积土构成。与典型的海相沉积土相比,海陆交互沉积土在固结特性、剪切特性、指标变异性等方面存在差异^[1]。陈晓平^[2]针对珠江三角洲海陆交互沉积软土的固结特性进行了研究,分析了固结作用对土体基本力学特性的影响,提出了考虑固结效应的量化分析方法。拓勇飞等^[3]通过对湛江海陆交互沉积软土的研究得出,由于受到构造运动与复杂地质应力的耦合作用,沉积土表现出特殊的沉积特征,胶结作用使其具有较高的结构强度。柳艳华等^[4]、张宏等^[5]、刘志斌等^[6]、石名磊等^[7]对长江口海陆交互沉积土物理力学性质进行了深入研究。研究结果表明,该地区浅层土体的渗透性较好,超孔压反映灵敏;而深层土体的渗透性较差。土体的物理与力学性质指标不完全吻合,物理性质与软黏土相似,但原位强度与天然含水量却与硬黏土相似。基于试验结果,提出了评价该类土工程性质的新方法。

土体分布具有典型的地域特征,目前针对海陆交互沉积土蠕变特性的研究相对较少。本文采用一维蠕变试验,针对大连海陆交互沉积土的蠕变特性进行了研究。通过对试验结果的回归分析,建立了可以考虑土体主、次固结效应的蠕变方程,为地基土体的长期变形预测提供参考。

2 试验方法

2.1 土体基本物理性质

试验土样为取自施工现场的海床原状样,取土深度介于14~25 m之间。采用薄壁取土器压入式取土,试样采取后立即用胶布封裹,再进行蜡封,在运输与试验过程中尽量减小对试样的扰动。土样为典型的海陆交互沉积土,以黏土与粉质黏土为主,呈灰~灰褐色,可塑状态,土体的物理性质指标见表1。

表1 土体物理性质参数

分类	含水率/ %	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	液限/ %	塑限/ %	液性 指数
黏土	39.2	17.9	1.10	48.7	24.3	0.61
粉质黏土	25.1	19.6	0.70	31.2	16.9	0.57

2.2 试验方案

采用WG-1B型固结仪对14 m(黏土)、18 m(黏土)及25 m(粉质黏土)处土样进行排水条件下的一维蠕变试验,每组试样设定重复试验。试样直径为61.8 mm,高为20 mm。考虑土体的原位应力状态及上部回填荷载的大小,试验中荷载等级设定为50、100、200、400、800及1 600 kPa。每级荷载施加完成后,按设定的时间间隔读取变形量,直至变形达到稳定状态为止。本试验的变形稳定标准设置为24 h内的变形量小于0.01 mm,试验过程中温度控制在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

3 海陆交互沉积土次固结特性分析

3.1 蠕变特性分析

图1为14、18、25 m深度土样应变与孔隙比时程曲线。由图1可见,在荷载施加初期,土体应变较小,随着固结时间的增加,应变逐渐增大,并最终达到稳定状态。其中,高固结压力(400、800 kPa)作用下的土样变形量相对较大,对应的稳定时间越长,主次固结的分界点也越来越明显。对于正常固结土而言,当荷载等级小于先期固结压力时,土体的变形量较小;当荷载等级大于先期固结压力时,土体的变形速率与变形量随之增加,由此产生上述蠕变规律。与应变变化规律相反,孔隙比随着固结时间的增加而减小。荷载施加初期曲线斜率变化较大,而加载后期曲线斜率基本保持不变。其中,低固结压力(100、200 kPa)作用下的孔隙比-时间曲线近似为直线;而高固结压力作用下的曲线呈反“S”形,这与文献[8]中香港沉积土变形规律相似。总体来看,不同深度(14、18、25 m)土样的变形规律基本一致,由时间对数法得出在各级固结压力施加后的100 min内,主固结基本完成。

为分析应变随固结压力的变化规律,以25 m深度土样蠕变试验结果为例,图2列出其应力-应变等时曲线。由图2可见,不同时间下的等时曲线表现出明显的非线性特性,随固结压力的增加,曲线斜率越来越小。当固结压力一定时,随着时间的增加,应变越来越大;当应变一定时,随着时间的增加,固结压力越来越小。由此可见,大连海陆交互沉积土具有典型的非线性蠕变特性,并且蠕变与加载历时有关。在低固结压力(50、100 kPa)下,等时曲线斜率较大;在高固结压力(800、1 600 kPa)下,等时曲线斜率较小。

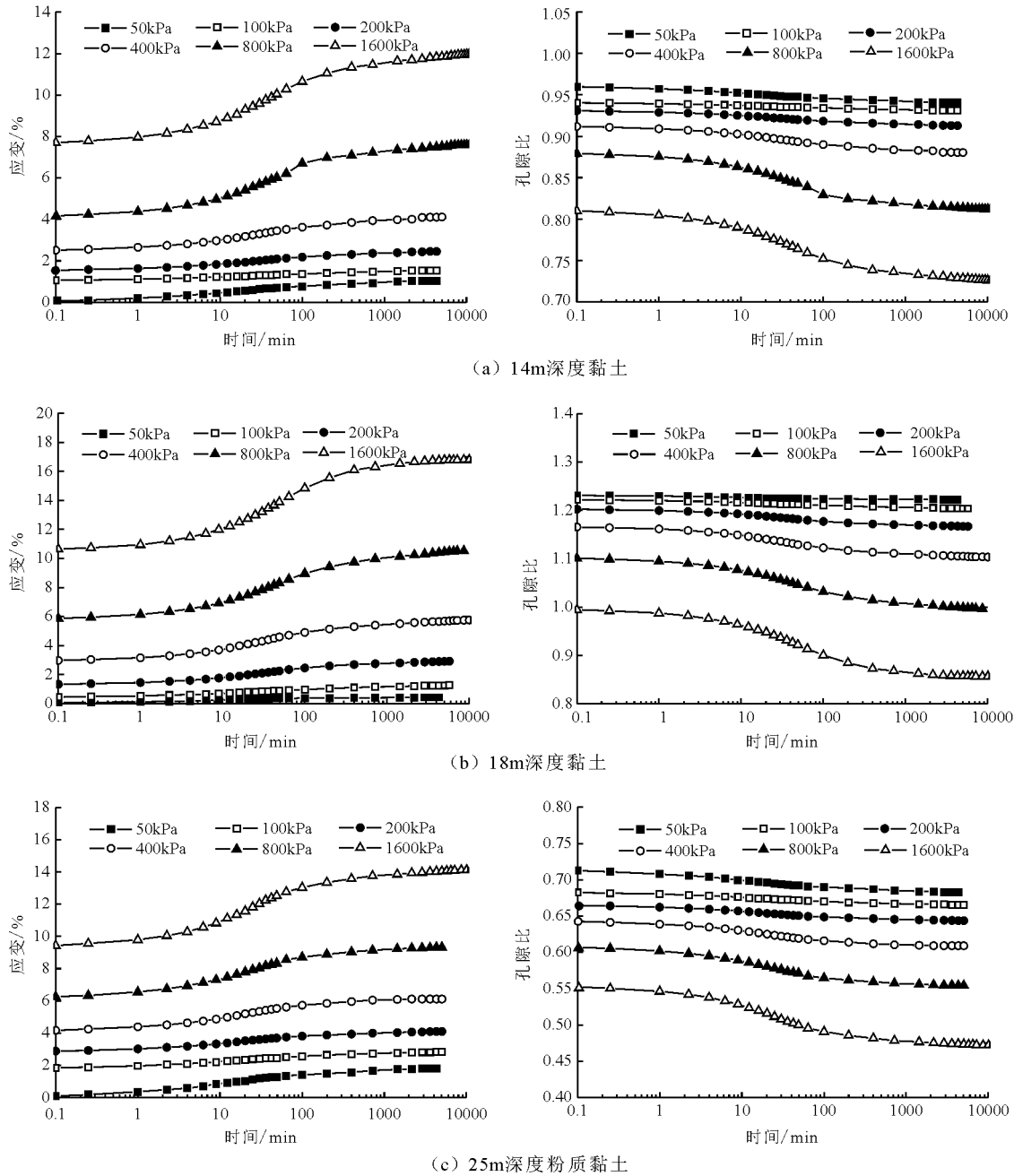


图1 土体应变、孔隙比随时间变化曲线

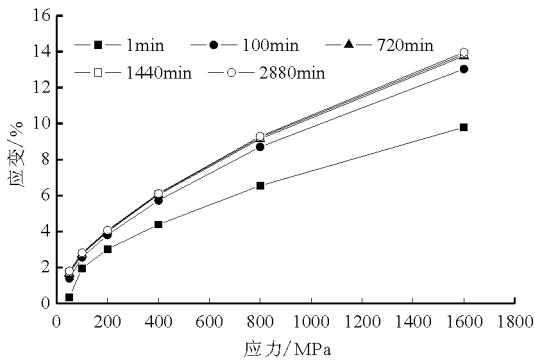


图2 25 m 深度粉质黏土应力-应变等时曲线

3.2 次固结系数 C_a 随时间变化规律

Buisman 认为在次固结变形阶段,次固结系数可由下式计算:

$$C_a = \frac{e_1 - e_2}{\lg t_2 - \lg t_1} \quad (1)$$

式中: C_a 为次固结系数; t_1 为主固结达到 100% 时的时间; t_2 为次固结计算时间; e_1 与 e_2 为对应于 t_1 与 t_2 时刻的孔隙比。

为分析次固结系数随时间变化规律,取 $t_1 = 100$ min,不同深度(14、18、25 m)土样次固结系数随时间变化曲线如图3所示。由图3可见,在次固结变形阶段,

次固结系数随着时间的增加逐渐减小。低固结压力下的曲线斜率较小,近似为一条直线;随着固结压力的增加,曲线斜率逐渐增大,相应次固结系数也明显增加。整体来看,18m 深度土样的次固结系数较大,25m 深度

土样的次固结系数相对较小。按文献[9]中次压缩系数来划分,18 m 深度沉积土属于高次压缩性土,而 14、25 m 深度沉积土属于中等次压缩性土。由此可见,大连海陆交互沉积土属于中等至高次压缩性土。

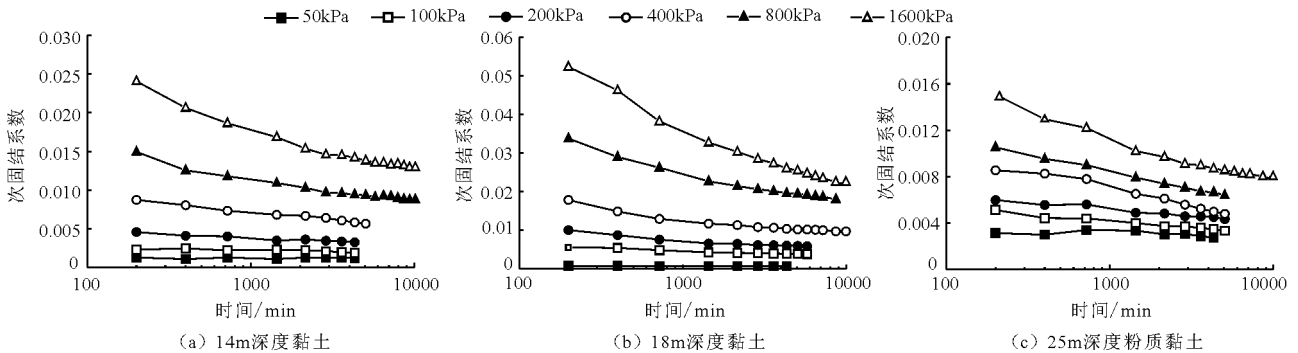


图 3 土体次固结系数 - 时间关系曲线

3.3 次固结系数 C_{α} 与固结压力关系

有关次固结系数与固结压力是否相关,研究者们持有不同看法。师旭超等^[10]、张惠明等^[11]通过对广西与深圳软土的研究得出,土体的次固结系数与固结压力无关。而雷华阳等^[12]、葛苗苗等^[13]、缪林昌等^[14]、张芳枝等^[15]通过研究得出次固结系数与固结压力相关。陈晓平^[2]认为次固结系数与固结压力的关系实际上与土体的固结状态相关,由此导致不同的研究结论。图 4 为 14、18、25 m 深度海陆交互沉积土次固结系数与固结压力关系曲线。由图 4 可见,对于正常固结的海陆交互沉积土而言,次固结系数随着固结压力的增加而增大。通过对试验数据的回归分析得出,14、18、25 m 深度土样的次固结系数与固结压力近似为线性关系,相关系数均大于 0.9。由此可以得出,大连海陆交互沉积土的次固结系数与固结压力有关。

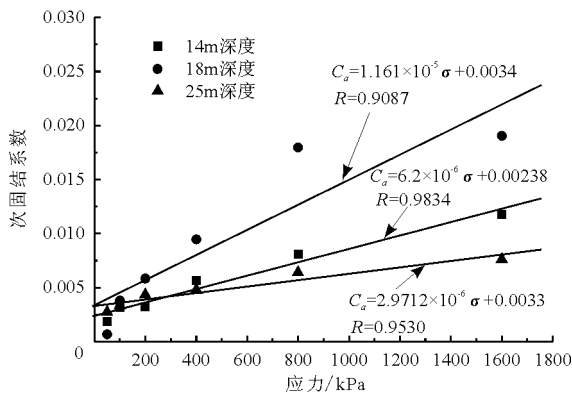


图 4 次固结系数 - 固结应力关系曲线

3.4 次固结系数 C_{α} 与压缩指数 C_c 关系

Mesri 等^[16]通过研究得出,原状土的次固结系

数与压缩指数的比值介于 0.025 ~ 0.10 之间,并且对于同一种原状土,二者的比值为常数,该结论得到了多位学者的认可^[10-11,14-15,17]。针对大连海陆交互沉积土,经过计算得出 14、18、25 m 深度土体的次固结系数与压缩指数的比值介于 0.033 ~ 0.058 之间,与 Mesri 结论相符。

4 海陆交互沉积土蠕变方程

4.1 蠕变方程建立

关于主固结与次固结的关系存在两种假设,假设 A 认为可以将主固结压缩与次固结压缩分开,超孔压消散为零的点即为主固结终点(EOP),次固结系数用来计算超孔压消散为零后的蠕变压缩。假设 B 认为蠕变发生在固结过程中,即主固结与次固结同时发生^[18]。现阶段的研究结果表明,主、次固结确实同时存在。因此,本文以 25 m 深度粉质黏土蠕变试验结果为例,尝试基于假设 B 建立适用于大连海陆交互沉积土的蠕变方程。

将 25 m 深度粉质黏土试验结果整理绘制成应变与时间双对数曲线,结果如图 5 所示,拟合方程见表 2。由图 5 可见,各级固结压力作用下的应变与时间近似为线性关系,二者满足如下关系式:

$$\lg \varepsilon(\sigma, t) - \lg \varepsilon(\sigma, t_0) = m(\lg t - \lg t_0) \quad (2)$$

将式(2)整理后得到:

$$\varepsilon(\sigma, t) = \varepsilon(\sigma, t_0) \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \quad (3)$$

式中: σ 为固结应力, kPa; t 为固结时间, min; t_0 为参考时间, min; m 为应变 - 时间曲线的斜率; $\varepsilon(\sigma, t)$ 为对应于固结应力 σ 与时间 t 时的应变。

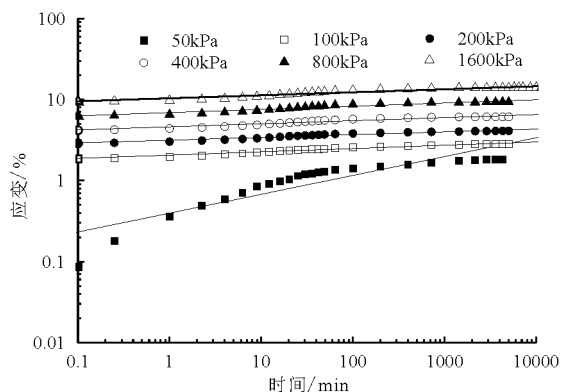


图5 25m深度粉质黏土应变-时间双对数曲线

表2 应力-时间曲线拟合方程

应力/kPa	曲线方程	相关系数 R
50	$\lg(\varepsilon) = 0.11268 \lg(t) - 0.48949$	0.89886
100	$\lg(\varepsilon) = 0.07091 \lg(t) + 0.37196$	0.98067
200	$\lg(\varepsilon) = 0.05368 \lg(t) + 0.53082$	0.97618
400	$\lg(\varepsilon) = 0.04435 \lg(t) + 0.74367$	0.96874
800	$\lg(\varepsilon) = 0.03996 \lg(t) + 0.88527$	0.96786
1600	$\lg(\varepsilon) = 0.03124 \lg(t) + 1.02855$	0.96529

图6为25m深度粉质黏土应变与固结压力双对数等时曲线。由图6可见,应变随固结压力的增加而增大,不同时刻下的应变与固结压力近似为线性关系,等时曲线的斜率均值为0.63338。应变与固结应力满足如下关系式:

$$\lg \varepsilon(\sigma, t) - \lg \varepsilon(\sigma_0, t) = n(\lg \sigma - \lg \sigma_0) \quad (4)$$

将公式(4)整理后得到:

$$\varepsilon(\sigma, t) = \varepsilon(\sigma_0, t) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (5)$$

式中: σ_0 为参考应力, kPa; n 为应变-固结应力曲线的斜率。

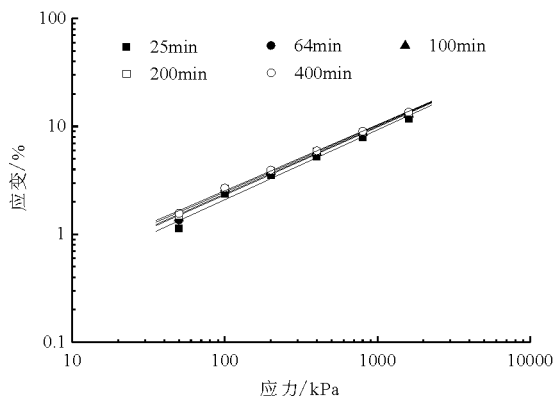


图6 25m深度粉质黏土应变-固结应力双对数曲线

合并公式(3)与公式(5)得到蠕变方程:

$$\varepsilon(\sigma, t) = \varepsilon(\sigma_0, t_0) \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (6)$$

式中: $\varepsilon(\sigma_0, t_0)$ 为对应于参考应力 σ_0 与参考时间 t_0 时的应变。

由以上分析得出,该蠕变方程共有3个参数,分别为 $\varepsilon(\sigma_0, t_0)$ 、 m 、 n 。其中, $\varepsilon(\sigma_0, t_0)$ 为对应于参考时间 t_0 与参考应力 σ_0 的应变; m 为应变-时间曲线的斜率; n 为应变-应力曲线的斜率。以上参数均可由蠕变试验结果获取。通过对14、18、25m深度土体蠕变试验结果的回归分析,表3列出不同固结应力下的模型参数。

表3 模型参数

深度/ m	应力/ kPa	参考应 力/kPa	参考时 间/min	$\varepsilon(\sigma_0, t_0) /$ %	m	n
14	50	100	100	1.370	0.12573	0.75518
	100	100	100	1.370	0.03569	0.75518
	200	100	100	1.370	0.03242	0.75518
	400	100	100	1.370	0.02535	0.75518
	800	100	100	1.370	0.03024	0.75518
	1600	100	100	1.370	0.02057	0.75518
18	50	100	100	0.955	0.11295	1.06804
	100	100	100	0.955	0.09645	1.06804
	200	100	100	0.955	0.08710	1.06804
	400	100	100	0.955	0.07130	1.06804
	800	100	100	0.955	0.04549	1.06804
	1600	100	100	0.955	0.02077	1.06804
25	50	100	100	2.145	0.11268	0.63338
	100	100	100	2.145	0.07091	0.63338
	200	100	100	2.145	0.05368	0.63338
	400	100	100	2.145	0.04435	0.63338
	800	100	100	2.145	0.03996	0.63338
	1600	100	100	2.145	0.03124	0.63338

4.2 蠕变方程验证

为了验证蠕变方程的可靠性,采用该方程针对14、18、25m深度土体的蠕变试验结果进行了计算,结果对比如图7所示。

由图7可见,在固结压力施加初期,试验值与计算值差值较大;随着固结时间的增加,试验值与计算值吻合越来越好。整体来看,计算结果与试验结果吻合度较高,验证了蠕变方程的可靠性,表明该模型适用于描述大连海陆交互沉积土的蠕变特性。此外,蠕变方程具有模型参数少、易获取等特点,可为地基的长期变形预测提供参考。

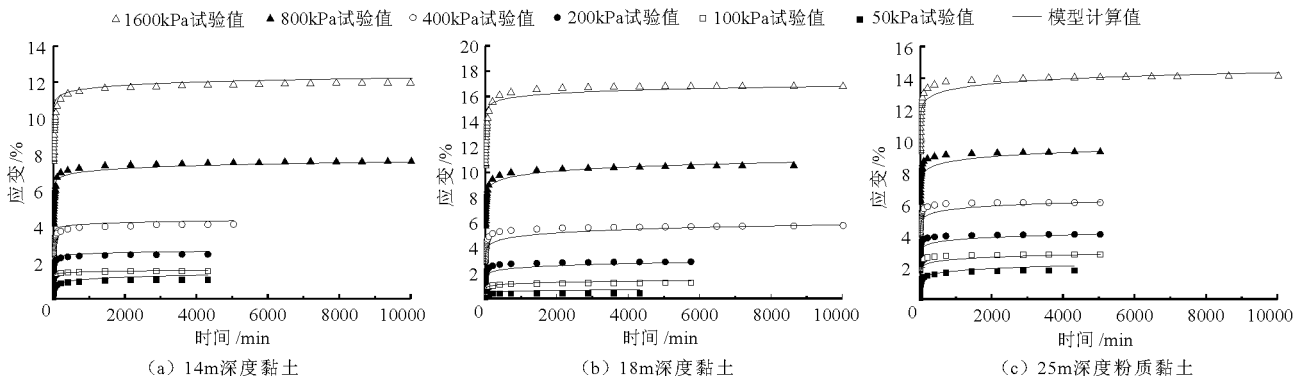


图7 试验与计算结果对比

5 结论

采用一维蠕变试验针对大连海陆交互沉积土的蠕变特性进行了研究。基于蠕变试验结果,建立了幂函数形式的蠕变方程,得出以下结论:

(1)大连海陆交互沉积土的应变随固结时间与固结压力的增加而增大,孔隙比随固结时间与固结压力的增加而减小。各级固结压力施加 100 min 后基本进入次固结变形阶段。

(2)大连海陆交互沉积土具有典型的非线性蠕变特性,随固结压力的增加,蠕变特性愈加明显。土体次固结系数与固结压力相关,次固结系数与压缩指数的比值与 Mesri 结论相符。

(3)试验与模型计算结果吻合较好,表明蠕变方程适用于描述大连海陆交互沉积土的一维蠕变特性,可为地基的长期变形预测提供指导。

参考文献:

- [1] 陈晓平,黄国怡,梁志松. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003, 22(1): 137-141.
- [2] 陈晓平. 海陆交互沉积软土固结效应[J]. 岩土工程学报,2011,33(4):520-528.
- [3] 拓勇飞,孔令伟,郭爱国,等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1879-1884.
- [4] 柳艳华,石名磊. 海陆交互相下黏性土性状辨析及评价研究[J]. 岩土力学,2008,29(2):523-528.
- [5] 张宏,柳艳华,石名磊,等. 海陆交互相下粘性土的性状研究[J]. 岩土力学,2005,26(9):1491-1494.
- [6] 刘志彬,刘松玉,经纬,等. 长江口海陆交互沉积土复合地基孔压响应特性[J]. 岩土工程学报,2015, 37(S2): 91-95.
- [7] 石名磊,张波,洪振舜. 天然沉积中间土的力学特性研究[J]. 岩土力学,2005,26(11):1753-1756.
- [8] Yin J H. Non-linear creep of soils in oedometer tests[J]. Géotechnique, 2015,49(5):699-707.
- [9] 吴宏伟,李青,刘国彬. 上海黏土一维压缩特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(4):630-636.
- [10] 师旭超,汪稔,张在喜. 广西海相淤泥的次固结特性研究[J]. 岩土力学,2003,24(5):863-865.
- [11] 张惠明,徐玉胜,曾巧玲. 深圳软土变形特性与工后沉降[J]. 岩土工程学报,2002,24(4):509-514.
- [12] 雷华阳,肖树芳. 天津软土的次固结变形特性研究[J]. 工程地质学报,2002,10(4):385-389.
- [13] 葛苗苗,李宁,郑建国,等. 考虑黄土时效变形特性的高填方工后沉降预测[J]. 土木工程学报,2015, 48(S2):262-267.
- [14] 缪林昌,张军辉,陈艺南. 江苏海相软土压缩特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(11):1711-1714.
- [15] 张芳枝,陈晓平,黄国怡. 珠江三角洲饱和软粘土的固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 192-194.
- [16] Mesri G, Godlewski P M. Time and stress compressibility interrelationship [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1979, 105(5):417-430.
- [17] 周秋娟,陈晓平. 软土次固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006,27(3): 404-408.
- [18] 殷建华,Jack I C. 土体与时间相关的一维应力-应变性状、弹粘塑性模型和固结分析[J]. 岩土力学, 1994, 15(3):65-80.